

بررسی تأثیر حجم بستر بر عملکرد راکتور لجن فعال بستر ثابت در کاهش بار آلی فاضلاب مصنوعی

۱-سهند جرفی: دانشجوی دکتری بهداشت محیط دانشگاه تربیت مدرس - تلفن: ۰۹۱۶۳۶۱۰۹۱۵۳

Email: sahand359@yahoo.com

۲- محمد مهدی مهربانی: کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست - آب و فاضلاب

۳- احمد رضا یزدان بخش: دانشیار و عضو هیأت علمی دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

سابقه و هدف: در مطالعات تصفیه زیستی فاضلاب های شهری و صنعتی از انواع بسترها با درصدهای پرشدگی مختلف در بخش هوادهی راکتور لجن فعال استفاده شده است. معرفی یک حد مشخص پر شدگی امری دشوار و وابسته به شرایط فنی و اقتصادی محلی است. هدف از این پژوهش تعیین تأثیر حجم بستر بر عملکرد راکتور لجن فعال بستر ثابت در کاهش بار آلی فاضلاب مصنوعی می باشد.

روش مطالعه: یک راکتور لجن فعال بستر ثابت با درصدهای پرشدگی مختلف با بستر ثابت به میزان ۱۰ الی ۳۰ درصد در غلظت های COD ورودی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ mg/L و زمان ماند هیدرولیکی ثابت ۴ ساعت مورد آزمایش قرار گرفت.

یافته ها: بیشترین بازده حذف COD در غلظت های ورودی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ mg/L به ترتیب ۹۷/۳ و ۹۴/۸۳ درصد برای حجم بستر ۳۰ درصد به دست آمد. نتایج آزمون های آماری نشان می دهد که حد بهینه پرشدگی بستر برای غلظت COD ورودی ۵۰۰ mg/L معادل ۲۰ درصد و برای غلظت COD ورودی ۱۰۰۰ mg/L معادل ۲۵ درصد بود.

نتیجه گیری: نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که افزایش درصد پرشدگی راکتور هوادهی با بستر ثابت دارای همبستگی مثبت و مستقیمی با کارایی راکتور است. ولی حجم بهینه بستر باید با توجه به شرایط فنی و اقتصادی محلی به طور اختصاصی تعیین شود.

کلمات کلیدی: لجن فعال - حجم بستر - تصفیه فاضلاب - بار آلی

Surveying the effect of packing volume on performance of fixed bed activated sludge reactor for removal of organic matter in the synthetic wastewater

Abstract

Introduction: In researches about treatment of domestic and industrial wastewaters, different types of packing with variable filling grade are used. Suggestion of a certain value of filling with packing is difficult and dependent to the site specific technical and economical conditions. The purpose of this study

was to determine the effect of packing volume on performance of fixed bed activated sludge reactor for removal of organic matter in the synthetic wastewater.

Methods: A fixed bed activated sludge reactor with different filling grades of packing, including 10 to 30% was experimented in two COD concentrations of 500 and 1000 mg/L with constant HRT of 4 hours.

Results: The most COD removal efficiency in influent COD concentrations of 500 and 1000 mg/L were 97.3 and 94.83% respectively, both for filling grade of 30%. The data obtained from the statistical analysis show that the optimum filling grade of packing for COD concentration o 500 mg/L was 20% and for COD concentration of 1000 mg/L was 25%.

Conclusion: The data obtained from this study indicate that increase of filling grade of packing in aeration tank has direct and positive correlation with efficiency of reactor. But optimum volume of packing should be determined site specific according to technical and economical conditions.

Key words: Activated sludge – Packing volume – wastewater treatment – organic loading

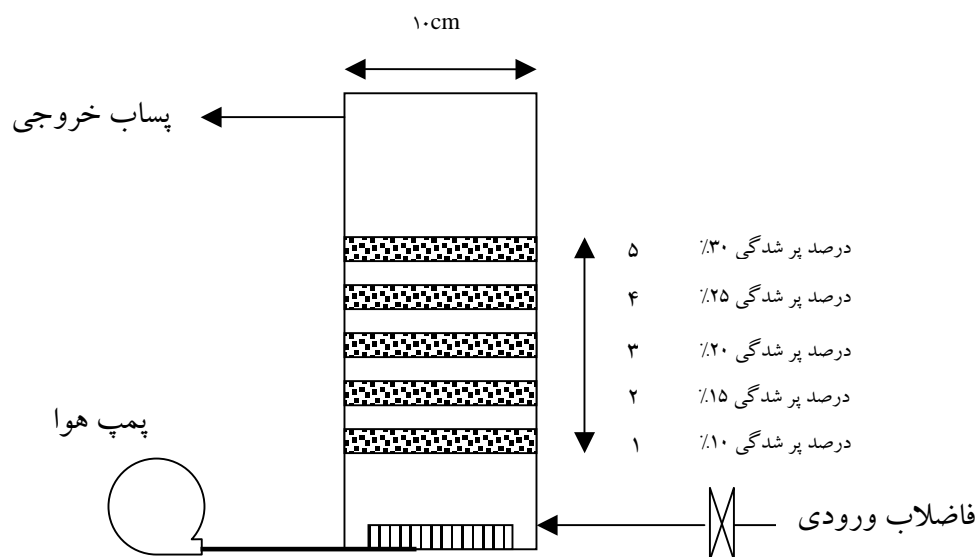
۱- مقدمه

فرایندهای تلفیقی مبتنی بر فیلم میکروبی یکی از انواع فرایندهای زیستی تصفیه فاضلاب به شمار می روند که در آنها علاوه بر میکروارگانیزم های معلق، از میکروارگانیزم های رشد یافته بر روی یک بستر جهت تصفیه فاضلاب استفاده می شود (۱،۲). این راکتورها با موفقیت برای معدنی سازی ترکیبات مختلف آلی مورد استفاده قرار گرفته اند (۳،۴). معمولاً یک راکتور تلفیقی زیستی که به منظور تصفیه منابع نقطه ای فاضلاب طراحی می شود، باید قادر به تصفیه نرخ های جریان بالا و نرخ تبدیل زیستی بالا باشد، حتی الامکان حجم کوچکی داشته باشد، دارای ضمانت بالای معدنی سازی کامل باشد و تحمل شوک جریان و شوک مواد سمی را داشته باشد. همچنین در حین راهبری پیوسته، جلوگیری از شسته شدن جرم سلولی سازگار ساز شده درون راکتور بسیار مهم است (۵،۶). از دیگر خصوصیات ارزنده این سیستم ها می توان به تصفیه مؤثر فاضلاب های دارای غلظت مواد آلی کم، قابلیت حذف مواد آلی دارای سرعت تجزیه کم، انرژی مصرفی کمتر، امکان رشد میکروارگانیزم های دارای بازده رشد پایین و تولید پسابی با کیفیت بهتر اشاره کرد (۷،۸). بسیاری از محققان در مطالعات خود به نتایجی دست یافته اند که مدعی هستند کاربرد راکتورهای تلفیقی رشد معلق با بستر رشد چسبیده ثابت یا متحرک می تواند اهداف فوق را تأمین کند (۹-۱۰). کاربرد راکتورهای زیستی دارای بسترهای ثابت یا متحرک برای تجزیه بسیاری از آلاینده های آلی رو به گسترش است و تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. ملکی و برقی (۱۳۸۴) از سنگ پامیس به عنوان بستر ثابت رشد بیوفیلم در یک راکتور بیوفیلمی برای تصفیه فاضلاب کارخانه قند استفاده نمودند (۱۱). در مطالعه دیگری دلنواز و آیتی (۱۳۸۷) از راکتور بیوفیلیمی بستر متحرک برای حذف آنیلین از فاضلاب استفاده نمودند (۱۲). بررسی و جمع بندی نتایج مطالعات دیگران نشان می دهد که جنس مدیا مورد استفاده به عنوان بستر و درصد پرشدگی راکتور هوادهی لجن فعال با بستر وجه تمایز تحقیقات مختلف است. سؤال اساسی پیش روی متخصصان این حوضه آن است که برای یک نوع فاضلاب خاص صنعتی یا شهری، چه نوع بستری و از چه جنسی استفاده شود و دیگر آنکه حجم اشغال حوضچه هوادهی با بستر رشد میکروبی چقدر است. در تحقیقات مختلف، کاربرد مدیاهایی از جنس های مختلف با درصدهای پرشدگی متغیر در حوضچه هوادهی راکتور، برای انواع فاضلاب ها نتایج مختلفی به همراه داشته است. بنابراین یک نتیجه گیری نهایی و ارائه یک طرح کلی به لحاظ حجم بستر و نوع مدیا امر دشواری است که نیازمند تحقیقات محلی با توجه به شرایط اختصاصی همان محل است. با توجه به موارد مذکور تعیین حجم بهینه بستر با توجه به وارداتی بودن اغلب بسترهای مورد استفاده و هزینه بر بودن آن در مقیاس های عملیاتی کامل، نکته مهمی است. هدف از این مطالعه تعیین تأثیر حجم بستر بر عملکرد راکتور لجن فعال بستر ثابت در کاهش بار آلی فاضلاب مصنوعی می باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲: ساختار راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت

شکل (۱) نمایی از راکتور لجن فعال بستر ثابت مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. راکتور مورد استفاده در این مطالعه شامل یک مخزن استوانه‌ای شکل پلاکسی گلاس به حجم کل ۱۱ لیتر بود. در مراحل مختلف مطالعه، به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد از حجم بخش هوادهی به وسیله یک مدیا تجاری ویژه به نام لانه زنبوری^۱ از جنس پلی استایرن پر شد. مدیا مورد نظر به وسیله محفظه های پلاکسی گلاس مشبک در حجم های مورد نظر، در مراحل مختلف مطالعه در قسمت هوادهی جاگذاری شد. مشخصات مدیا در جدول ۱ نشان داده شده است. به منظور هوادهی راکتور از یک پمپ آکواریومی استفاده شد. تأمین اختلاط مناسب در این سیستم نیز با کمک جریان هوای ورودی انجام می پذیرفت. راکتور در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد (در آزمایشگاه) راهبری گردید و pH آن به وسیله بی کربنات سدیم در محدوده ۷ تا ۷/۵ تنظیم شد.



^۱ Bee Cell

شکل ۱: نمای شماتیک راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت رشد میکروبی

جدول ۱: مشخصات مدیا مورد استفاده به عنوان بستر

مشخصات	پارمتر
پلی استایرن فشرده	جنس مواد
18 cm^2	سطح ویژه هر عدد مدیا
۳۶۱۰۰۰	تعداد مدیا در هر متر مربع
$650 \text{ m}^2/\text{m}^3$	سطح ویژه
۱۴۰ Kg	وزن هر متر مکعب
۸۷ %	تخلخل
سفید	رنگ
1030 kg/m^3	چگالی

۲-۲: راه اندازی راکتور لجن فعال بستر ثابت

به منظور تأمین میکروارگانیزم های مورد نیاز برای راه اندازی راکتور، ۹ لیتر لجن فعال از خط برگشت لجن یک تصفیه خانه فاضلاب شهری به راکتور منتقل شد. برای راه اندازی راکتور از گلوکز به عنوان منبع کربن استفاده شد. به منظور تأمین منابع نیتروژن و فسفر به ترتیب از ترکیبات کلرور آمونیوم و دی هیدروژن پتاسیم فسفات استفاده گردید. جهت ایجاد شرایط بهینه رشد میکروارگانیزم ها در طول تحقیق نسبت مناسب C:N:P به میزان ۱:۵:۱۰۰ تنظیم شد (۱۳،۱۴). ترکیب شیمیایی فاضلاب مصنوعی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ترکیب فاضلاب ساختگی مورد استفاده برای غلظت COD ورودی ۵۰۰ mg/L

مقدار مورد نیاز در یک لیتر آب شهر	نوع ترکیب
۱۰۰۰ میلیگرم	C ₆ H ₁₂ O ₆
۲۸ میلیگرم	NH ₄ Cl
۵/۶ میلیگرم	KH ₂ PO ₄
۰/۸ گرم	Na ₂ CO ₃
۱ میلی لیتر	عناصر جزئی

پس از انتقال لجن فعال به راکتور هوادهی دارای بستر ثابت، سیستم به مدت ۶ هفته به صورت ناپیوسته مورد راهبری قرار گرفت. در این مدت هوادهی به منظور تأمین اکسیژن محلول به میزان ۳-۵ mg/L انجام گرفت. سیستم در ابتدا بر مبنای COD محلول ۵۰۰ mg/L راه اندازی شد. پس از دستیابی به شرایط پایدار در حالت راهبری ناپیوسته، جریان راکتور پیوسته شده و راهبری با درصد پر شدگی بستر ۱۰ درصد آغاز شد. راکتور در همه درصد های پر شدگی با بستر ثابت به میزان ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد، با غلظت های COD ۵۰۰ و ۱۰۰۰ mg/L و زمان ماند هیدرولیکی ثابت ۴ ساعت مورد آزمایش قرار گرفت. شرایط پایدار در این مطالعه به صورت عدم وجود بیش از ۵ درصد تغییرات در پارامترهای مورد بررسی پس از خروجی طی ۷ الی ۱۰ روز راهبری متوالی راکتور تعریف شد. پارامترهای مورد بررسی شامل غلظت COD خروجی، MLSS بخش معلق، TSS پس از خروجی، بیوفیلم چسبیده به بستر، دما، اکسیژن محلول و pH تا زمان دستیابی به شرایط پایدار مورد پایش قرار گرفتند. همه داده های آزمایشگاهی ارائه شده در طول مطالعات بر مبنای میانگین حسابی، با حداقل ۳ بار تکرار آزمایش بوده که پس از حذف داده های مخدوش و غلط ثبت می گردیده اند.

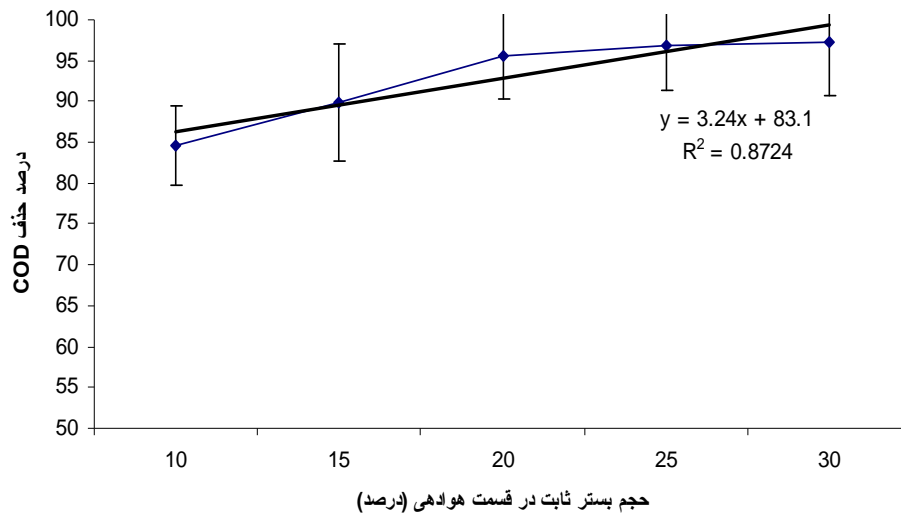
۳-۲: روش های آزمایشگاهی

غلظت COD به روش رفلکس برگشتی باز، اکسیژن محلول به روش یدومتری وینکلر، TSS پساب خروجی و MLSS بخش معلق به روش وزن سنجی حرارتی، (۱۵)، دما به وسیله ترمومتر و pH به روش الکترومتری اندازه گیری می شدند. pH سیستم به وسیله یک pH متر دیجیتال با مارک Hach به طور دائم اندازه گیری می شد. بیوفیلم چسبیده به بستر به روش وزنی - حرارتی سنجش شد (۱۶).

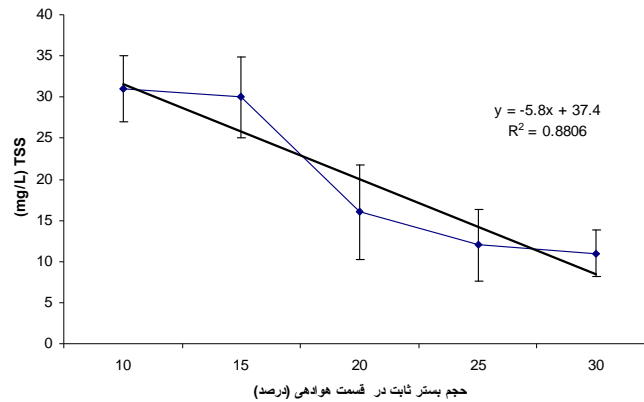
۳: نتایج

۳-۱: راهبری در غلظت COD معادل ۵۰۰ mg/L و حجم های مختلف بستر

مقادیر بازده حذف COD در این مرحله در شکل ۲ نشان داده شده است. بیشترین بازده حذف COD در حجم بستر ۳۰ درصد به میزان ۹۷/۳ (انحراف معیار $\pm ۶/۵۸$) و کمترین بازده حذف در حجم بستر ۱۰ درصد به میزان ۸۴/۶ (انحراف معیار $\pm ۴/۹۳$) به دست آمد. مقادیر بازده حذف COD در حجم های بستر ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به ترتیب ۸۹/۸ (انحراف معیار $\pm ۷/۱۸$)، ۹۵/۶ (انحراف معیار $\pm ۵/۳۸$) و ۹۶/۸ (انحراف معیار $\pm ۵/۴۶$) درصد بود. مقادیر TSS پساب خروجی در حجم های بستر ۱۰ الی ۳۰ درصد به ترتیب ۳۱، ۳۰، ۱۶، ۱۲ و ۱۱ mg/L بود. روند تغییرات TSS پساب خروجی در شکل ۳ نشان داده شده است.

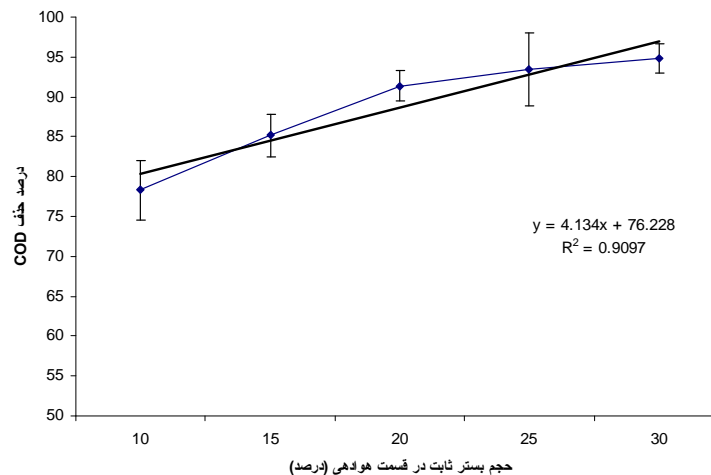


شکل ۲: بازدهی راکتور در حجم های مختلف بستر ثابت و غلظت COD ثابت ۵۰۰ mg/L

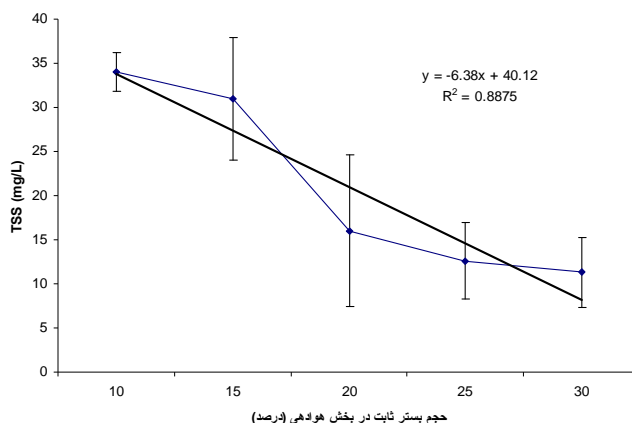


شکل ۳: غلظت TSS پساب خروجی در حجم های مختلف بستر ثابت و غلظت COD ثابت ۱۰۰۰ mg/L

۲-۳: راهبری در غلظت COD معادل ۱۰۰۰ mg/L و حجم های مختلف بستر کارایی راکتور در غلظت COD ورودی ۱۰۰۰ mg/L و حجم های بستر ثابت ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد به ترتیب ۷۸/۳ (انحراف معیار $\pm ۳/۴۶۶۹$)، ۸۵/۱۹ (انحراف معیار $\pm ۲/۶۸$)، ۹۱/۳۶ (انحراف معیار $\pm ۱/۸۹$)، ۹۱/۴۷ (انحراف معیار $\pm ۴/۶۱$) و ۹۴/۸۳ (انحراف معیار $\pm ۱/۸۲$) بود. روند تغییرات بازده حذف COD در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر غلظت TSS پساب خروجی در حجم های بستر ۱۰ الی ۳۰ درصد به ترتیب ۳۴، ۳۱، ۱۶، ۱۲/۶ و ۱۱/۳ mg/L بود.



شکل ۴: بازدهی راکتور در حجم های مختلف بستر ثابت و غلظت COD ثابت ۱۰۰۰ mg/L



شکل ۵: غلظت TSS پساب خروجی در حجم های مختلف بستر ثابت و غلظت COD ثابت ۱۰۰۰ mg/L

۳-۳: تغییرات جرم میکروبی در حجم های مختلف بستر ثابت

روند تغییرات جرم میکروبی چسبیده (بیوفیلم) و معلق مایع مخلوط (MLSS) در حجم های مختلف بستر ثابت در شرایط پایدار در جدول ۲ خلاصه شده است. بیشترین جرم میکروبی چسبیده در هر دو غلظت COD ورودی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ mg/L در حجم های بستر ثابت ۳۰ درصد به ترتیب به میزان ۱/۹۶ و ۲/۳۳۴ گرم حاصل شد. غلظت MLSS در شرایط مذکور به ترتیب ۲۱۴۰ و ۲۱۶۳ mg/L بود. همچنین کمترین جرم میکروبی چسبیده در حجم بستر ثابت ۱۰ درصد به میزان ۰/۶۳ گرم برای COD معادل ۵۰۰ mg/L و ۰/۸۶ گرم برای COD معادل ۱۰۰۰ mg/L به دست آمد.

جدول ۲: تغییرات جرم میکروبی درون راکتور لجن فعال بستر ثابت در حجم های مختلف بستر

COD = ۱۰۰۰ mg/L		COD = ۵۰۰ mg/L		حجم بستر (%)
MLSS (g/L)	بیوفیلم (g)	MLSS (g/L)	بیوفیلم (g)	
۲۰۹۳	۰/۸۶	۲۰۷۸	۰/۶۳	۱۰
۲۰۹۶	۱/۰۹	۲۱۰۸	۰/۸۴	۱۵
۲۱۸۹	۱/۹۷۵	۲۱۳۶	۱/۳۱۵	۲۰
۲۱۴۶	۲/۲۸۹	۲۱۳۵	۱/۸۳۵	۲۵
۲۱۶۳	۲/۳۳۴	۲۱۴۰	۱/۹۶	۳۰

۴: بحث

روند تغییرات بازده حذف COD در هر دو غلظت COD معادل ۵۰۰ و ۱۰۰۰ mg/L نشان می دهد که کارایی راکتور به موازات افزایش درصد پرشدگی راکتور با بستر ثابت افزایش یافته است. مهمترین دلیل این امر افزایش جرم سلولی درون راکتور است که خود تابعی از حجم بستر ثابت درون راکتور می باشد. نتایج نشان می دهد که بازده حذف COD ورودی ۵۰۰ mg/L با حجم بستر ثابت درون بخش هوادهی دارای همبستگی مستقیم با ضریب ۰/۸۷ است. همچنین بازده حذف COD ورودی ۱۰۰۰ mg/L با حجم بستر ثابت درون بخش هوادهی دارای همبستگی مستقیم با ضریب ۰/۹۰ است. بیشتر بودن ضریب همبستگی نشان می دهد که روند تغییرات حذف COD در بارهای آلی بالاتر یکنواخت تر است که ناشی از بیشتر بودن جرم میکروبی درون راکتور و پایداری بیشتر راکتور در برابر تغییرات شرایط بهره برداری است. از آنجا که درصد پرشدگی حوضچه هوادهی لجن فعال با بستر ثابت از جنبه های مهم طراحی و بهره برداری به لحاظ اقتصادی و اجرایی است، رابطه حجم بستر با بازده حذف COD به لحاظ آماری مورد آزمون قرار گرفت. نتایج آزمون T test با p value برابر ۰/۰۵ نشان می دهد که به هنگام راهبری با COD ورودی ۵۰۰ mg/L، بازده حذف در درصد های پر شدگی ۱۰ و ۱۵ درصد با درصد های پر شدگی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد اختلاف معنی داری دارد (p value بیشتر از ۰/۰۵). بازده حذف COD بین درصد های پرشدگی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد به لحاظ آماری اختلاف معنی داری نداشت (p value کمتر از ۰/۰۵). با توجه به این امر می توان نتیجه گیری کرد به هنگام تصفیه فاضلاب های دارای غلظت COD در حدود ۵۰۰ mg/L در مقیاس کامل، میان حجم های بستر ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد تفاوت کارایی چندانی وجود ندارد که این امر به لحاظ اقتصادی و خرید مدیا می تواند مدنظر قرار گیرد. نتایج آزمون آماری در هنگام راهبری با COD معادل ۱۰۰۰ mg/L نشان می دهد که میان حجم های بستر ۱۰ و ۱۵ درصد و حجم ۲۰ درصد اختلاف معنی داری وجود داشت (p value بیشتر از ۰/۰۵). از سویی میان حجم های ۱۰ و ۱۵ درصد و ۲۰ درصد با حجم های بستر ۲۵ و ۳۰ درصد اختلاف معنی داری مشاهده شد (p value بیشتر از ۰/۰۵) و بین حجم های ۲۵ و ۳۰ درصد اختلاف معنی داری وجود نداشت (p value کمتر از ۰/۰۵). کیفیت مطلوب TSS پساب خروجی یکی از جنبه های بارز راکتورهای تلفیقی دارای رشد چسبیده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که کیفیت TSS پساب خروجی به طور کلی در محدوده های استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست برای تخلیه پساب خروجی به منابع آبی پذیرنده می باشد. روند تغییرات TSS پساب خروجی نشان می دهد که غلظت TSS به موازات افزایش درصد پرشدگی راکتور هوادهی با بستر ثابت کاهش می یابد. وجود بستر ثابت و بیوفیلم موجود بر روی سطح آن که بسیاری از ذرات معلق را به دام می اندازد و مقدار کمتر باکتری های آزاد و شناور، SRT بالا بیوفیلم و تک یاخته هایی که از باکتری های آزاد تغذیه می کنند (۱۷-۲۰)

(از مهمترین دلایل کیفیت بالای پساب سیستم های تلفیقی رشد معلق – رشد چسبیده به شمار می روند. نتایج آزمون آماری T test نشان می دهد که غلظت COD ورودی در درصد های پرشدگی یکسان بستر، تأثیر معنی داری بر غلظت TSS پساب خروجی ندارد (p value کمتر از ۰/۰۵). نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که افزایش درصد پرشدگی راکتور هوادهی با بستر ثابت دارای همبستگی مثبت و مستقیمی با کارایی راکتور است. البته غلظت COD ورودی نقش بسزایی بر این امر دارد. در غلظت COD معادل ۵۰۰ mg/L درصد پر شدگی ۲۰ درصد و در غلظت COD معادل ۱۰۰۰ mg/L درصد پرشدگی ۲۵ درصد به عنوان حجم های بهینه بستر معرفی می شوند. در کاربردهای مقیاس کامل باید از طریق مطالعات مقدماتی مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت و همچنین در نظر گرفتن شرایط فنی و اقتصادی محلی، درصد پر شدگی بهینه به طور اختصاصی تعیین شود.

منابع

- 1- Yen-Hui L. Kinetics of nitrogen and carbon removal in a moving-fixed bed biofilm reactor. *Applied Mathematical Modeling*. 2008. 32(11), 2360–2377.
- 2- Bajaj M., Gallert C., Winter J. Biodegradation of high phenol containing synthetic wastewater by an aerobic fixed bed reactor. *Bioresource Technology*. 2008. 99(17), 8376–8381.
- 3- Erhan E., Yer E., Akay G., Keskinler B., Keskinler D. Phenol degradation in a fixed bed bioreactor using micro-cellular polymer-immobilized *Pseudomonas syringae*. *Journal of Chem. Technol. Biotechnol.* 2004. 79, 195–206.
- 4- Bajaj M., Gallert C., Winter J. Biodegradation of high phenol containing synthetic wastewater by an aerobic fixed bed reactor. *Bioresource Technology*. 2008. 99, 8376–8381.
- 5- Dallas E., Weaver. Design and operations of fine media fluidized bed biofilters for meeting oligotrophic water requirements. *Aquacultural Engineering*. 2006. 34, 303–310.
- 6- Drioli E., Romano M. Progress and new perspectives on integrated membrane operations for sustainable industrial growth. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001. 40, 1277–1300.
- 7- Xin Z., Yanming W., Zhengfang Y. Oil field wastewater treatment in biological aerated filter by immobilized microorganisms. *Process Biochemistry*. 2006. 41(7), 1475-1483.
- 8- Cresson R., Escudie R., Steyer J., Delgenes J., Bernet N. Competition between planktonic and fixed microorganisms during the start-up of methanogenic biofilm reactors. *Water Research*. 2008. 42(3), 792-800.
- 9- Asok Adaka., Anjali Pal. Removal of phenol from aquatic environment by SDS-modified alumina: Batch and fixed bed studies. *Separation and Purification Technology*. 2006. 50 256–262.
- 10- Borghei S., Sharbatmaleki M., Pourrezaie P., Borghei G. Kinetics of organic removal in fixed-bed aerobic biological reactor. *Bioresource Technology*. 2008. 99, 1118–1124.

۱۱- ملکی، م و برقی، م. (۱۳۸۴). عملکرد سنگ پامیس به عنوان بستر ثابت بیوفیلم در راکتور بیوفیلمی هوازی. *مجله علمی پژوهشی آب و فاضلاب اصفهان*، شماره ۵۶، ص ۶۲.

۱۲- دلنواز، آ، آیتی، ب و گنجی دوست، ح. (۱۳۸۷). تصفیه فاضلاب حاوی آنیلین با استفاده از بیوفیلمی با بستر متحرک. *مجله علمی پژوهشی آب و فاضلاب اصفهان*، شماره ۵۶، ص ۹.

13- Metcalf and Eddy (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4th Edition. Mc Graw-Hill Inc.

14- Gabriel, B. (2005). *Wastewater Microbiology*. 3rd Edition. Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida. JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.

15- APHA (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. 21th Edition. American Public Health Association, New York, USA.

16- Plattes M., Henry E., Schosseler P., Weidenhaupt A. Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater. *Biochemical Engineering Journal*. 2006. 32, 61–68.

17- Yen-Hui Lin. Kinetics of nitrogen and carbon removal in a moving-fixed bed biofilm reactor. *Applied Mathematical Modelling*. 2008. 32, 2360–2377.

18- Huang B., Wang Y., Zhang S., Yong A. Kinetic Model of Fixed Bed Reactor with Immobilized Microorganisms for Removing Low-Concentration SO₂. *Journal of Natural Gas Chemistry*. 2007. 16, 86-91.

19- Bajaj M., Gallert C., Winter J. Biodegradation of high phenol containing synthetic wastewater by an aerobic fixed bed reactor. *Bioresource Technology*. 2008. 99, 8376–8381.

20- Lohi A., Alvarez Cuenca M., Anania G., Upreti S., Wan L. Biodegradation of diesel fuel-contaminated wastewater using a three-phase fluidized bed reactor. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. 154, 105–111.